

# Дифференциальные датчики систем аварийной защиты

## в тиристорных преобразователях повышенной частоты для индукционного нагрева металлов

**В статье рассмотрены эффективные датчики аварийных режимов тиристорных преобразователей повышенной частоты (ТППЧ) для установок индукционного нагрева металлов. Приведены схемы включения датчиков, осуществляющих контроль следующих аварийных режимов ТППЧ: замыкания силовых элементов на «землю» и «срывы» высокочастотных колебаний мостового тиристорного инвертора. Датчики выполнены в виде ферритовых колец необходимого диаметра с выходной, вторичной обмоткой. Первичными обмотками, включенными по дифференциальной (разностной) схеме, являются силовые проводники ТППЧ. Приведены временные и параметрические зависимости PSpice-моделей датчиков, полученные в результате схемотехнического моделирования в демонстрационной версии программы-симулятора Micro-Cap 9, выпущенной компанией Spectrum Software.**

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Семен Шапиро, д. т. н.

svshap@ufacom.ru

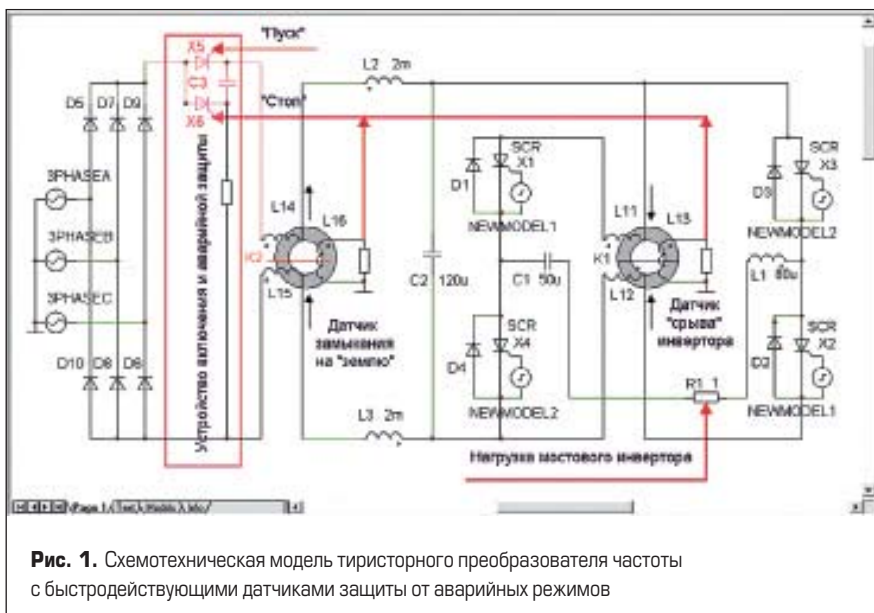
### Создание схемотехнической модели ТППЧ с датчиками быстродействующей защиты

Необходимой задачей при проектировании ТППЧ является разработка системы управления и защиты от аварийных режимов. Система защиты должна быть селективной, то есть различным образом действовать в предаварийных ситуациях и при наступлении аварийного режима. Пример предаварийной ситуации — уменьшение протока воды в системе охлаждения ТППЧ, в этом случае его достаточно выключить обычным образом, электромагнитным контактором. Экстренное (принудительное) срабатывание защиты, когда развитие аварийного режима в ТППЧ

сопровождается коротким замыканием питающей сети, обычно осуществляется с применением быстродействующих бесконтактных устройств защиты. В данном случае необходимо использовать быстродействующие датчики, регистрирующие момент начала аварийного режима в ТППЧ и формирующие выходной сигнал на принудительное срабатывание системы защиты, отключая ТППЧ от питающей сети. При этом не требуется вмешательства обслуживающего персонала для замены дорогостоящих предохранителей, контактные средства защиты остаются замкнутыми и обеспечивают, при необходимости, автоматическое повторное включение ТППЧ современного уровня, осуществляемое после автоматической диагностики и контроля состояния элементов.

В данной статье рассматриваются дифференциальные датчики быстродействующей защиты и схемы их включения для мостовой схемы тиристорного автономного инвертора частотой 2000 Гц и более, мощностью от 60 кВт и выше. Эти датчики использовались еще в первых, несовершенных ТППЧ и находят широкое применение в высокочастотных электротермических установках для индукционного нагрева металлов, проектируемых и изготавливаемых в настоящее время. Они просты как колесо, автор которого также неизвестен, но функциональность и надежность их проверена временем и не подвергается сомнению. Сейчас, с применением PSpice-моделирования, наконец-то появилась возможность совместного проектирования силовых устройств с элементами защиты от аварийных режимов. Эмпирические методы проектирования на основе накопленного опыта не потеряли своей важности и дополняются результатами PSpice-моделирования — современным методом исследования устройств силовой электроники.

В далекие советские времена, на заре развития силовых устройств для высокочастотного индукци-



**Рис. 1.** Схемотехническая модель тиристорного преобразователя частоты с быстродействующими датчиками защиты от аварийных режимов

онного нагрева металлов, вопросы защиты ТППЧ от аварийных режимов были предметом специального исследования. В центральных издательствах выходили монографии [1, 2], публиковались авторские свидетельства на изобретения и статьи в периодических изданиях [3–9], проводились специализированные научно-технические конференции. В этой работе принимали участие и авторы. Сейчас внимание к этой проблеме уменьшилось. Это объективно объясняется, отчасти, улучшением качества современных компонентов силовых схем — тиристоров и диодов, демпфирующих элементов и т. д. Есть и субъективные причины, к которым можно отнести снижение квалификации, времени, средств и, наконец, энтузиазма инженеров — разработчиков электронной техники. Однако актуальность рассматриваемых в статье вопросов не уменьшается, поскольку происходит постоянная реновация (обновление) ТППЧ, которым нет альтернативы в машиностроительных отраслях промышленности [11, 20].

При эксплуатации ТППЧ наиболее часто возникает необходимость в аварийном отключении для предупреждения повреждения силовых полупроводниковых элементов — тиристоров и диодов. Наиболее вероятными неисправностями при использовании ТППЧ для индукционного нагрева металлов, закалки, плавки являются замыкания элементов нагрузки (кабелей, шин, конденсаторов, в особенности индуктора и т. д.) на «землю». Их количество за период эксплуатации электротермических установок, по нашей оценке, составляет около 50% всех неисправностей.

Частой причиной аварийного отключения (25%) в ТППЧ является «срыв» инвертирования тиристорного инвертора, вызванный превышением допустимых параметров силовых полупроводниковых приборов — тиристоров и диодов. Мы не рассматриваем другие случаи возникновения неисправности в ТППЧ, их может быть очень много, нам важнее предотвратить их последствия. Покажем, что рациональным решением является использование датчиков, интегрированных в силовую схему тиристорного преобразователя частоты.

На рис. 1 приведена разработанная схематехническая модель тиристорного преобразователя повышенной частоты с быстродействующими датчиками защиты от аварийных режимов мостового инвертора. Схематехническая модель ТППЧ изображена в виде трехфазного источника питания, устройства включения и аварийного отключения, тиристорного мостового

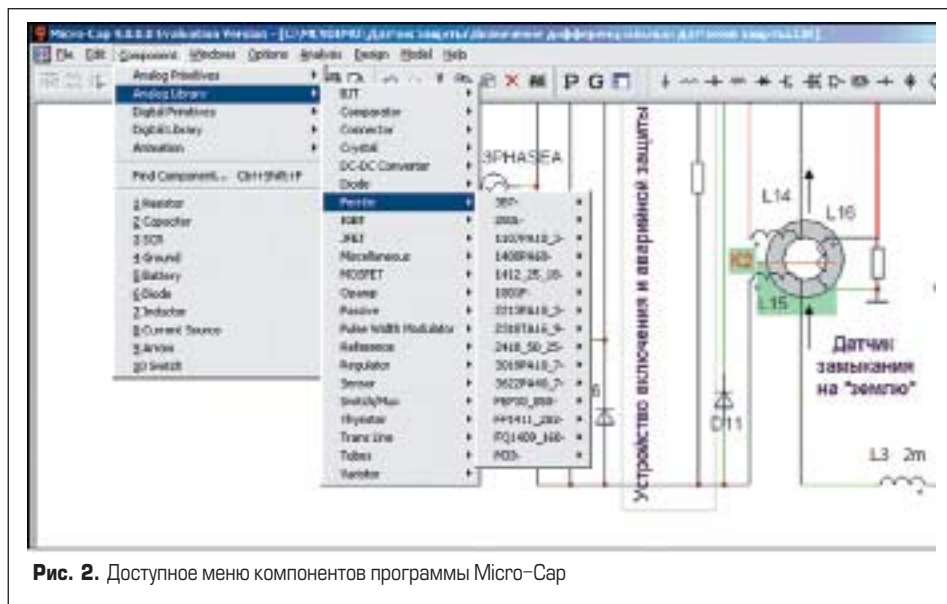


Рис. 2. Доступное меню компонентов программы Micro-Cap

автономного высокочастотного инвертора тока с нагрузкой, представленной эквивалентным сопротивлением R1 на рабочей частоте инвертора. ТППЧ, выполненный по приведенной схеме, предназначен для применения в высокочастотных установках индукционного нагрева металлов. В профессиональной версии программы Micro-Cap 9 возможно моделирование исполнительской (полной) принципиальной схемы ТППЧ (без упрощений), которая используется при проведении исследований, затем в практике наладки, эксплуатации и реновации ТППЧ, для различных технологических процессов. Таким образом, в настоящее время схематехнические модели не только являются необходимым атрибутом этапа проектирования, но и сопровождают достаточно сложные устройства силовой электроники на протяжении всего жизненного цикла.

В схематехнических моделях используются стандартные макросы основных компонентов схемы — тиристоров, диодов, ферритовых сердечников, источников напряжения и импульсных источников управляющих сигналов. Эти вопросы ниже не рассматриваются, т. к. они изложены в предыдущих публикациях авторов и других исследователей [15–20]. Далее рассмотрены вопросы проектирования и исследования элементов быстродействующей защиты, специфичных для аварийных режимов ТППЧ, для схематехнического моделирования которых достаточно возможностей демо-версии программы Micro-Cap 9 [21–23]. Основное отличие демо-версии от профессио-

нальной — ограниченное количество компонентов при моделировании, меньшая библиотека доступных PSpice-моделей и пониженная вычислительная производительность. Авторы далее приводят минимум текстового описания исследований, отдавая предпочтение более информативным иллюстрациям.

При создании схематехнической модели ТППЧ и проведении исследований нами используется программа Micro-Cap, рабочее меню которой аналогично другим программам операционной системы Windows, например Word.

На рис. 2 показано доступное меню программы-симулятора электрических схем Micro-Cap с выделенным компонентом электрической схемы — ферритовым сердечником датчиков защиты. В первом выпадающем окне (снизу) указаны использованные нами при создании схематехнической модели компоненты электрической схемы ТППЧ.

На рис. 3 показан фрагмент панели задания расчетных параметров для проведения исследований разработанной схематехнической модели ТППЧ. Успешное выполнение команды Run служит критерием соблюдения требований к разработке схематехнической модели ТППЧ в программе Micro-Cap, имеющей развитую систему диагностики и подсказок. Далее используются результаты оперативных исследований в режиме Analysis (преимущественно Probe Transient), особенности которых приведены в комментариях к полученным диаграммам с рассчитанными графиками временных и параметрических зависимостей.

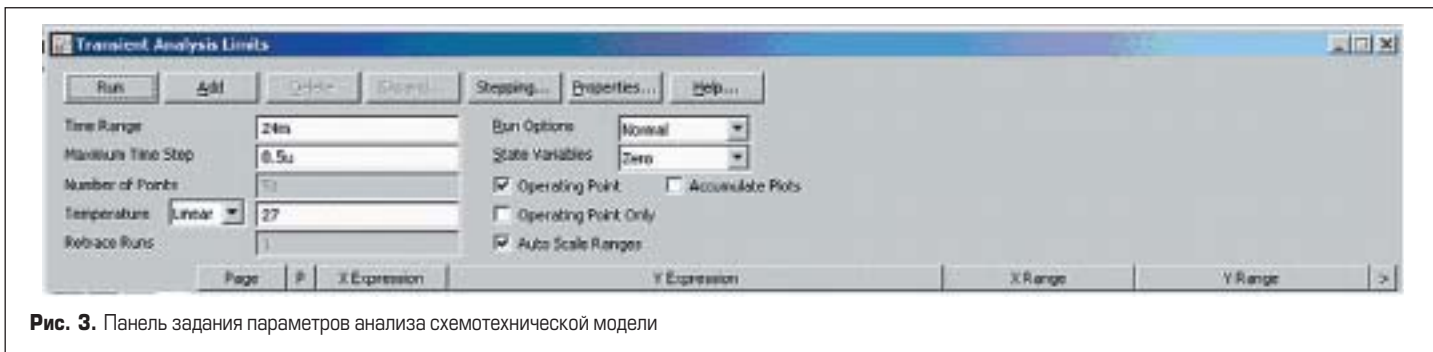


Рис. 3. Панель задания параметров анализа схематехнической модели

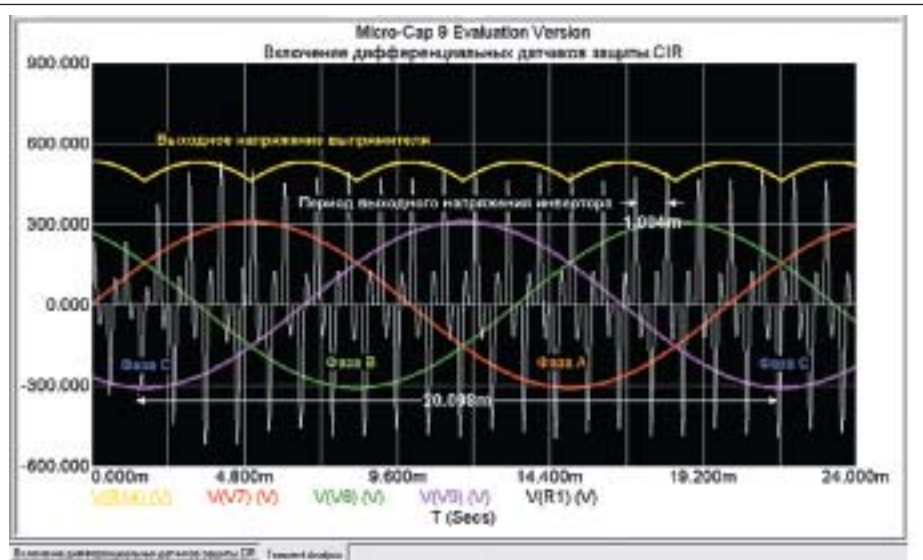


Рис. 4. Проверка функционирования схематехнической модели ТППЧ с датчиками защиты от аварийных режимов

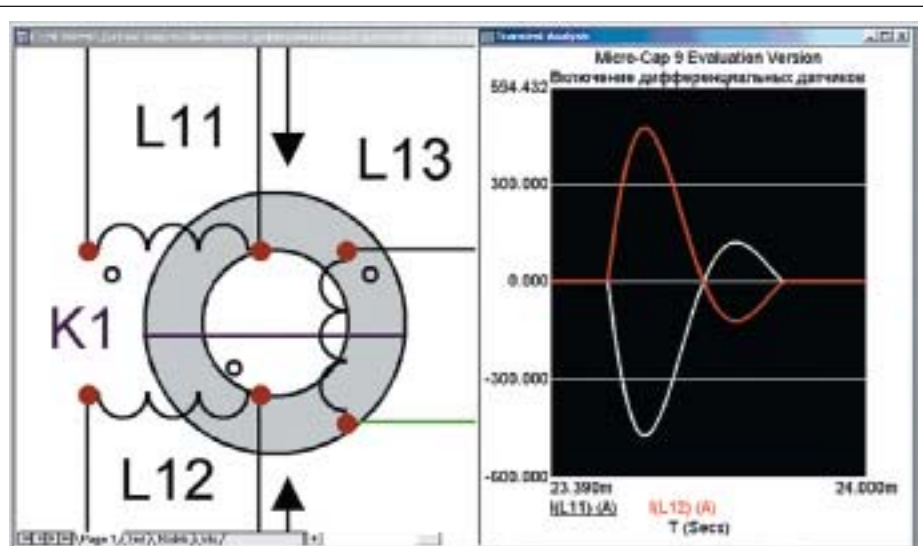


Рис. 5. Схематехническая PSpice-модель токового дифференциального датчика «срыва» инвертора (слева) и форма токов, протекающих через его первичные обмотки (справа)

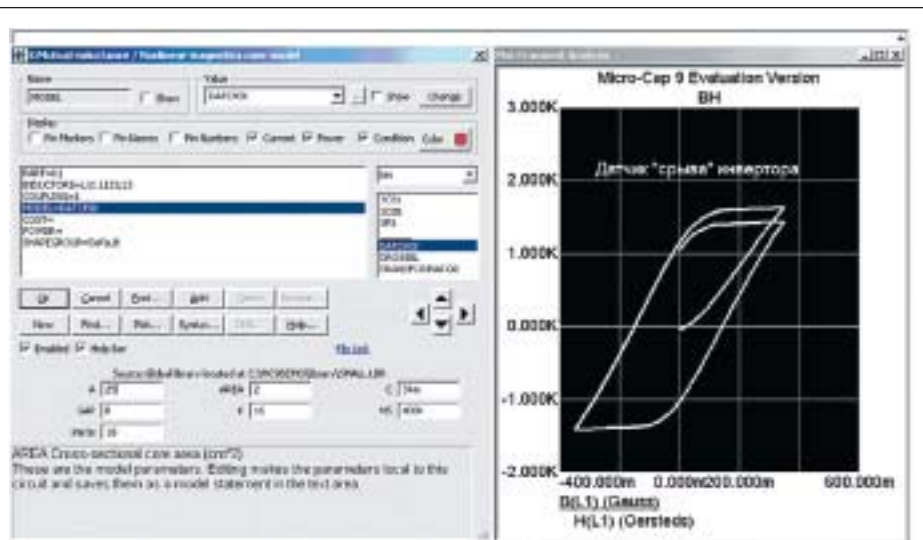


Рис. 6. Панель задания макроса PSpice-модели сердечника для датчика K1

Отметим, что для вывода параметрических зависимостей необходимо сохранять числовые значения всех рассчитанных зависимостей, а не только токов и напряжений.

На рис. 4 приведены временные зависимости напряжений в схематехнической модели: графики питающего ТППЧ сетевого трехфазного напряжения, получаемого от PSpice-моделей генераторов синусоидальных ЭДС с периодом 20 мс — 3PHASEA (фаза А), 3PHASEB (фаза В) и 3PHASEC (фаза С), образующих трехфазную систему; график выходного напряжения мостовой трехфазной схемы выпрямителя; график высокочастотного выходного напряжения ТППЧ с периодом повторения колебаний 1 мс, соответствующего рабочей частоте тиристорного инвертора 1000 Гц. Эти графики наглядно показывают принцип преобразования тока промышленной частоты в высокочастотные колебания выходного тока ТППЧ с промежуточным источником постоянного напряжения (выпрямителем).

### Особенности PSpice-моделирования дифференциальных датчиков системы защиты

На рис. 5 показан фрагмент схемы токового дифференциального датчика, который имеет выходную обмотку L13, конструктивно представляющую собой от 500 до 1000 витков тонкого, намотанного внавал (для уменьшения паразитной емкости) медного провода. Вторичная обмотка присоединена непосредственно к омическому сопротивлению — резистору величиной 0,5–1 Ом. Две первичные обмотки датчика представляют собой силовые проводники мостовой схемы инвертора, конструктивно проходящие через отверстие ферритового сердечника K1, ток в которых протекает в различных направлениях. Справа на рис. 5 показана форма токов проводников L11 и L12 мостовой схемы инвертора, протекающих через первичные обмотки. При нормальной работе инвертора эти токи равны (так как представляют один и тот же ток, протекающий в различном направлении).

Магнитные параметры, установленные в PSpice-модели сердечника K1 с именем DATSNIK, показаны на рис. 6. Геометрические параметры PSpice-модели сердечника для этого датчика следующие: AREA = 2 см<sup>2</sup> (поперечное сечение сердечника); GAP = 0 (воздушный зазор на пути магнитного потока); PATH = 18 см (длина магнитного пути).

Справа показана полученная зависимость B (Gauss) от H (Oersteds) для ферритового материала датчика (могут использоваться различные ферриты, так как значения индукции насыщения у них отличаются незначительно, а потери в сердечнике для данного применения датчика несущественны). В необходимых случаях осуществляется вывод графика кривой намагничивания в единицах СИ.

Сердечник датчика представляет собой стандартное кольцо из феррита диаметром 80–120 мм. Диаметр сердечника для дифференциального датчика определяется требованиями к размеру окна для размещения всех

обмоток. В PSpice-модели сердечника в качестве параметров магнитосвязанных обмоток указываются числа витков катушек индуктивностей  $L11 = 1$  виток,  $L12 = 1$  виток,  $L13 = 1000$  витков, что удобно для повторения конструкции датчика при проверке результатов схемотехнического моделирования.

На рис. 7 слева приведены результаты моделирования датчика «срыва» инвертирования в режиме нормальной работы ТППЧ. На вторичной обмотке  $L13$  величина помех пренебрежимо мала и при моделировании не превышает 16 нВ. Справа показан фрагмент схемы включения датчика «срыва» инвертора в схему тиристорного моста при номинальной нагрузке ТППЧ. С целью экономии ограниченных вычислительных ресурсов демо-версии Micro-Cap 9 на этом графике отражены не все расчетные точки.

На рис. 8 приведена диаграмма сигнала помех этого датчика для режима нормальной работы мостового тиристорного инвертора, полученная с большей точностью моделирования. Расчет приведен для идеального источника питания инвертора и в расширенном временном интервале. Порядок полученных результатов моделирования одинаков.

В датчике  $K2$  магнитные и геометрические параметры сердечника совпадают с аналогичными для ферритового сердечника  $K1$ . Отличием PSpice-модели от рассмотренной выше для датчика  $K1$  является иное название компонента схемотехнической модели и магнитная связь других индуктивностей (силовых проводников).

На рис. 10 слева приведена петля гистерезиса для датчика  $K2$ , справа — панель задания параметров модели кольцевого магнитного сердечника без воздушного зазора ( $GAP = 0$ ).

Датчик  $K2$  выполняет функции датчика замыкания на землю элементов ТППЧ. При возникновении такой неисправности в силовой схеме преобразователя частоты возникает асимметрия токов, протекающих по первичным обмоткам датчика, и в его выходной обмотке формируется импульс тока, вызывающий срабатывание аварийной защиты ТППЧ.

На рис. 11 показана амплитуда выходного напряжения дифференциального токового датчика  $K2$  (слева) и схема его симметричного включения на выходе выпрямителя со встречным направлением первичных обмоток.

Мы рассматриваем конкретные примеры включения датчиков аварийной защиты в рассматриваемую схему ТППЧ, использующие принцип дифференциального включения токовых датчиков. Эти датчики можно использовать в различных схемах ТППЧ на любых участках, где важна регистрация начала аварийного процесса.

**Действие дифференциальных датчиков при аварийных режимах ТППЧ**

Важнейшей характеристикой датчиков защиты от аварийных режимов является быстрдействие, понимаемое как задержка времени выходного сигнала при регистрации аварийного

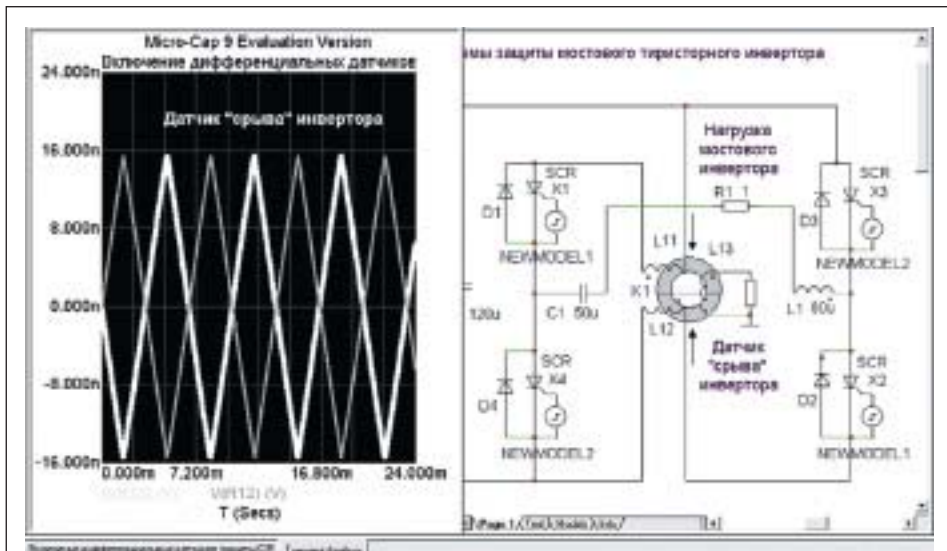


Рис. 7. Схема включения и результаты моделирования дифференциального токового датчика  $K1$  «срыва» колебаний инвертора

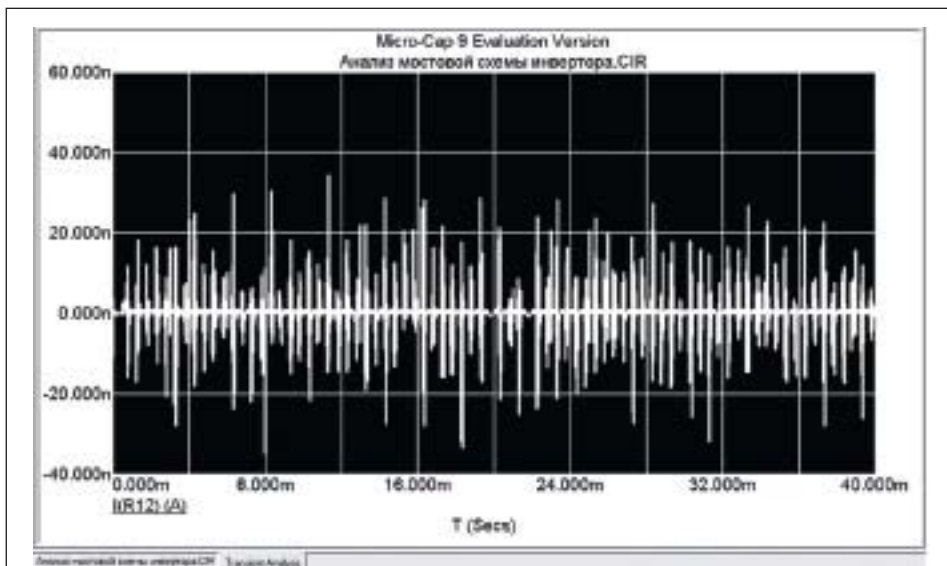


Рис. 8. График сигнала помех в дифференциальном датчике тиристорного мостового инвертора для расширенного временного интервала

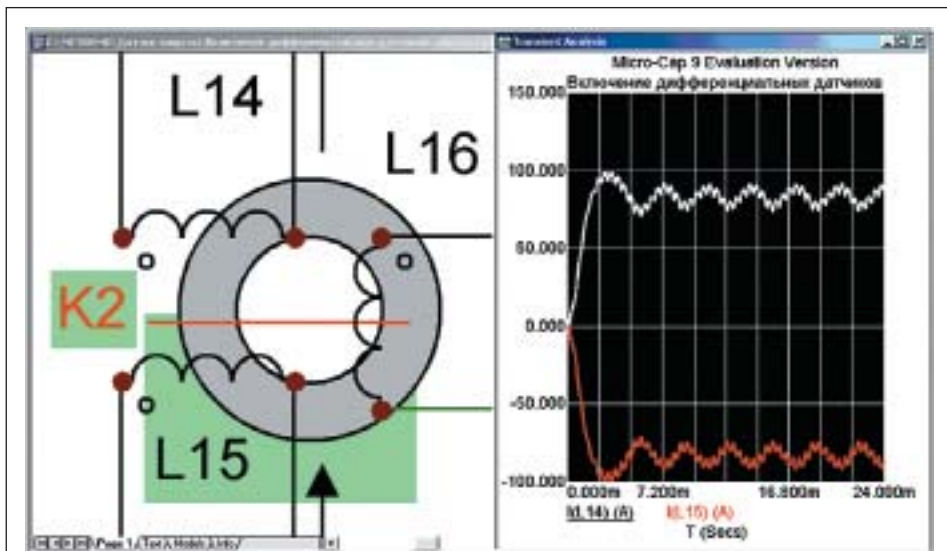


Рис. 9. Схемотехническая модель и графики токов в первичных обмотках датчика  $K2$

процесса. В ТППЧ для индукционного нагрева металлов развитие аварийного процесса ограничено значительной индуктивностью входного дросселя постоянного тока, тем не менее быстрое действие датчиков защиты очень важно.

На рис. 12 приведены временные диаграммы сигналов датчиков K1 и K2 при возникновении неисправности типа замыкания нагрузки инвертора на «землю», имитируемой замыканием реле SW1. ТППЧ при этом остается в ра-

ботоспособном состоянии. V(R12) — сигналы датчика замыкания на «землю», V(R13) — сигналы датчика «срыва» инвертора. Видно, что момент появления выходных сигналов датчиков совпадает с появлением неисправности. Этот сигнал должен вызвать принудительное отключение ТППЧ с помощью системы быстродействующей защиты, которая будет рассмотрена в следующей статье.

На рис. 13 показан выходной сигнал датчика «срыва» инвертирования K1 при моделировании срыва колебаний в мостовой схеме инвертора. Длительность этого сигнала не превышает одного периода высокой частоты тиристорного инвертора. Замыкание реле SW1 осуществляется случайным образом. Участок линейного нарастания тока соответствует глухому короткому замыканию на выходе источника питания инвертора. Согласно изложенному ранее, датчик K2 в это время не реагирует на такую неисправность в схеме инвертора.

Справа на рис. 13 выделены элементы релюкороткозамыкателя, имитирующего «срыв» инвертирования тиристорного мостового инвертора.

При правильной эксплуатации тиристорного преобразователя частоты (ТППЧ) он способен работать в течение длительного времени — от нескольких суток в непрерывном режиме до десятков лет с периодическим профилактическим обслуживанием. Правила техники безопасности требуют подключения конструктивных элементов электрооборудования электроустановок (преобразователь, нагревательный пост, станция охлаждения) к шине контурного заземления, что повышает вероятность касания элементов ТППЧ на «землю».

На рис. 14 показано подключение вторичной обмотки высокочастотного трансформатора ТППЧ, предназначенного для заделки шестерен большого диаметра, к шине заземления через специальную клемму. Первичная обмотка трансформатора не может заземляться, как и остальные элементы силовой схемы ТППЧ, развязанные от трехфазной сети силовым трансформатором.

Безаварийная работа ТППЧ обеспечивается эффективной системой защиты от аварийных режимов, которая использует рассмотренные токовые дифференциальные датчики. Одним из требований к датчикам защиты ТППЧ является отсутствие сигнала помех при нормальной работе устройства. Число витков одной обмотки в таком датчике равно числу проводников, проходящих через окно, и поэтому может быть только целым числом. Достоинством применения кольцевых (тороидальных) датчиков является их повышенная устойчивость к воздействию внешних электромагнитных помех, что важно для применения в устройствах силовой электроники.

Таким образом, мы рассмотрели и произвели анализ работы простых, но весьма эффективных и поэтому широко распространенных датчиков аварийной защиты ТППЧ. Сигналы с таких датчиков приводят в действие си-

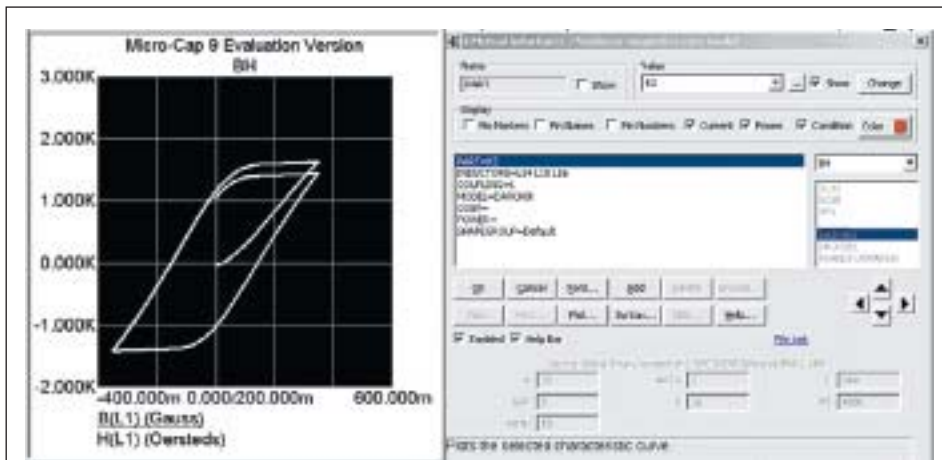


Рис. 10. Фрагмент графика кривой намагничивания датчика K2 и панель задания его параметров

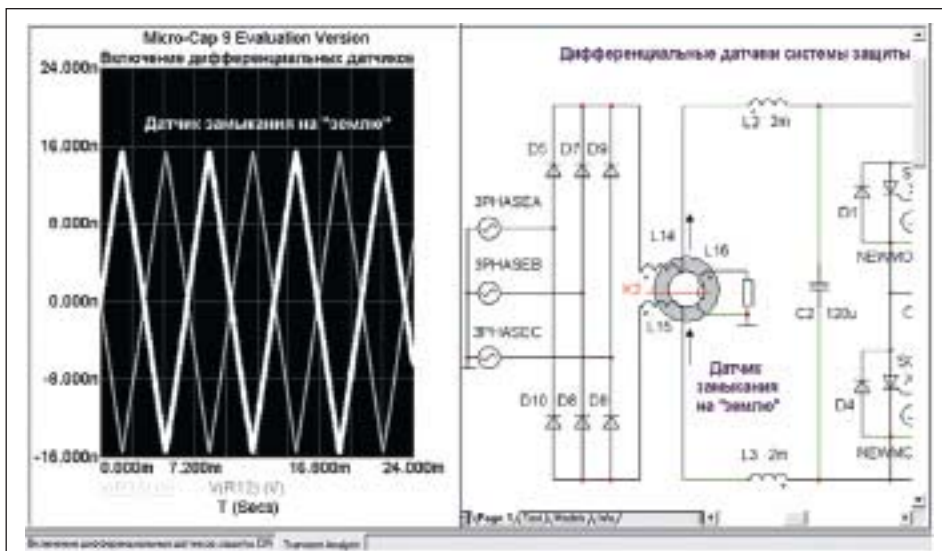


Рис. 11. Выходное напряжение датчика K2 при отсутствии замыкания элементов ТППЧ на «землю»

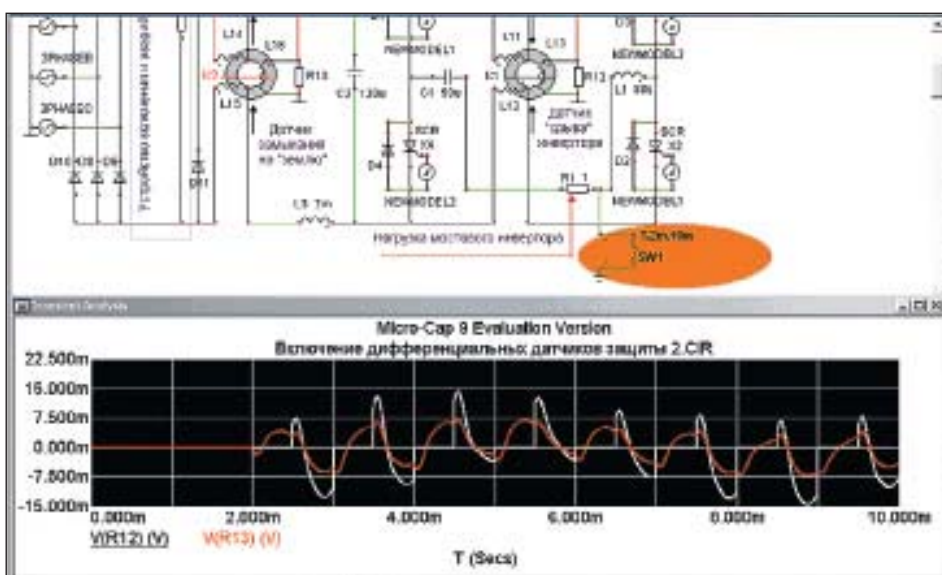


Рис. 12. Аварийные сигналы датчика «срыва» инвертирования — V(R12) и датчика замыкания на «землю» — V(R13)

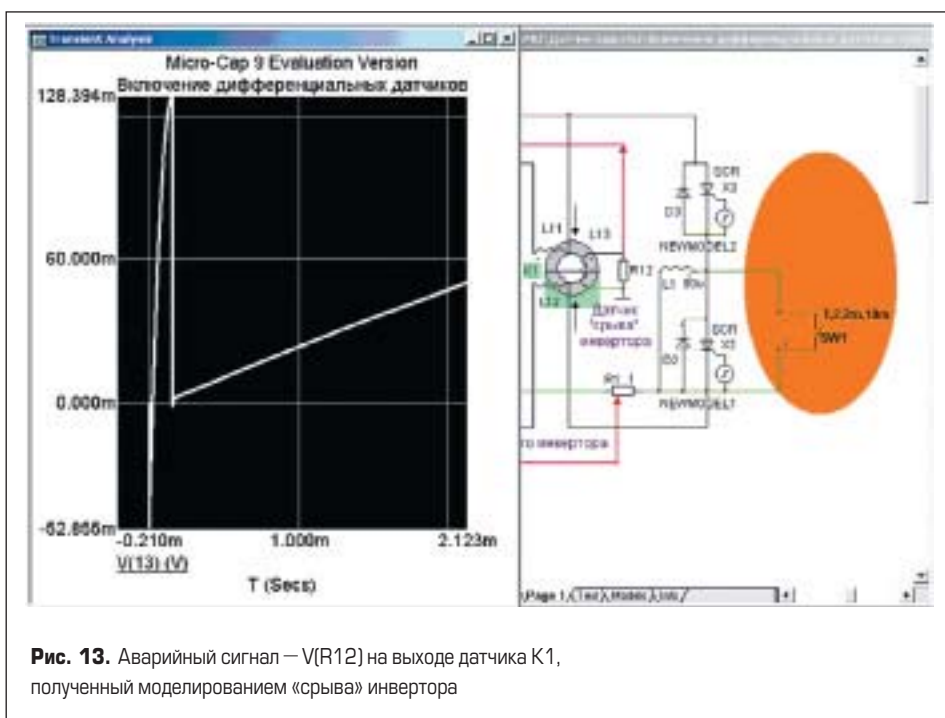


Рис. 13. Аварийный сигнал — V(R12) на выходе датчика К1, полученный моделированием «срыва» инвертора

стему быстродействующей бесконтактной защиты, что предотвращает повреждение элементов схемы тиристорного инвертора. Эффективность применения быстродействующей системы защиты основывается на том, что полупроводниковые элементы ТППЧ — тиристоры и диоды — способны выдержать без повреждения одиночный импульс тока, значительно превышающий номинальную величину.

Авторы благодарят инженера Антонова И. Ф. за многолетнюю работу по внедрению установок индукционного нагрева металлов, анализ причин их неисправного состояния и предоставленное фото нагрузки ТППЧ.

### Заключение

- Внимание к проектированию системы защиты ТППЧ в последнее время неоправданно уменьшилось. Это не значит, что они достигли совершенства. В то же время для проектирования силовой схемы тиристорного инвертора, выпрямителя или индукционной нагрузки ТППЧ разработчики получили эффективный ин-



Рис. 14. Подключение элементов нагрузки ТППЧ к клемме заземления

струмент исследований — программу-симулятор Micro-Cap, которая способна моделировать силовые схемы со встроенными аналоговыми датчиками защиты.

- Эффективными датчиками аварийных режимов ТППЧ являются интегрированные в силовую схему дифференциальные токовые датчики, малочувствительные к внешним электромагнитным помехам, быстродействие которых не превышает одного периода выходной частоты тиристорного инвертора.

### Литература

- Глух Е. М., Зеленев В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат. 1982.
- Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
- А. с. № 481964 (СССР) Устройство защиты источника питания / Кацнельсон С. М., Зинин Ю. М., Иванов А. М., Уржумсков А. М., Ройзман П. С. // Б. И. 1975. №31.
- А. с. № 513440 (СССР) Способ защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя / Зинин Ю. М., Иванов А. В., Пацкевич В. А., Уржумсков А. М. // Б. И. 1976. №17.
- Зинин Ю. М., Васюра В. В., Дубов С. А. Устройство защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя. Академия наук РБ. 1981. НТД № 81-5.
- А. с. № 1117770 (СССР) Устройство для защиты полупроводникового инвертора / Марон В. М., Зинин Ю. М., Ройзман П. С., Абсалямова Т. С., Абсалямов Ф. // Зарегистрир. в Госреестре изобретений 08.07.1983.
- А. с. № 1120897 (СССР) Устройство для защиты вентильного преобразователя / Белкин А. К.,

Дель В. Э., Закиров Р. А., Ройзман П. С., Зинин Ю. М. // Зарегистрир. в Госреестре изобретений 22.06.1984.

- Зинин Ю. М., Терешкин В. В. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования. Межвуз. науч. сб. «Электротехнические комплексы и системы». Уфа: УГАТУ. 2001.
- А. с. № 801176 (СССР) Устройство для защиты полупроводникового инвертора / Иванов А. В., Ройзман П. С., Уржумсков А. М., Зинин Ю. М. // Б. И. 1981. №4.
- Зинин Ю. М., Лобанов А. В. Система управления инверторно-индукционной установкой // Датчики и системы. 2008. № 5 (108).
- Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
- Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 3.
- Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
- Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
- Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
- Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование схмотехнической модели тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью // Силовая электроника. 2008. № 1.
- Зинин Ю. М. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
- Зинин Ю. М. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.
- Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Тиристорный преобразователь для индукционного нагрева металлов. Академия наук Республики Башкортостан. 1995. НТД № 95-4.
- Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П., Ветошкин А. В. Автоматизированный высокочастотный комплекс. Академия наук РБ. 1998. НТД № 98-24.
- Златин И. Новые возможности программы схмотехнического моделирования Micro-Cap // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
- [www.power-e.ru](http://www.power-e.ru). Сайт журнала «Силовая электроника».
- <http://www.spectrum-soft.com/manual.shtm>.